

ТЕСТ НА СПИРАЛЬНОЕ УДЛИНЕНИЕ С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМАЦИИ

THE TEST FOR SPIRAL ELONGATION FROM THE POSITION OF DEFORMATION MECHANICS

Логинов Ю.Н., Зуев А.Ю.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

ЗАО СП «Катур-Инвест»

The analysis of a standardized methodology for determining the rate SEN spiral elongation of copper wire. Any inconsistency in the wording of the standards. The tests of the wire in a variety of definitions SEN. Asked to verify compliance with the standards set by the creation of stress, as well as specify the degree of strain that has accumulated in the metal. Revealed that the use of high-temperature annealing of copper leads to the rising prevalence of spiral elongation and increases its stochastic value. Describes the state of stress that occurs in the experiments, and analyzed its role in the formation rate SEN.

Подавляющее количество проводных систем в технике и быту выполняется из меди электротехнического назначения. Требованиями ГОСТ 546-2001 [1] на медные катоды и техническими условиями ТУ 1844-01-48564189-2000 [2] на медную катанку предусмотрено проведение испытания меди на спиральное удлинение. Это испытание в соответствии с требованиями ГОСТ 28515-97[3] распространяется только на медь марки М00. Метод направлен на определение способности меди к рекристаллизации при заданных параметрах термической обработки, что косвенно свидетельствует о химической чистоте меди. Тем самым удается оценить содержание микропримесей, которое трудно оценить даже самыми современными методами анализа из-за малой их концентрации на уровне 0,0001 % (1 ppm).

Следует отметить, что описанный метод введен в практику исследований состояния металла относительно недавно и в технической литературе не затихают споры о достоверности оценки температуры рекристаллизации, а значит, и химической чистоты меди по показателю спирального удлинения[4,5].

Исследования, выполненные в Польше [6], на катодах Cu-CATH-1 и Cu-CATH-2 показали эффект влияния условий горячей обработки на

параметр SEN при использовании медных катодов одной и той же чистоты. Этот факт настораживает, поскольку метод определения спирального удлинения направлен на оценку именно химической чистоты металла, и при надежной интерпретации не должен зависеть от других факторов.

Аналогичное испытание с некоторыми отклонениями предусмотрено европейским стандартом EN 12893. Copper and copper alloys. Determination of spiral elongation number («Медь и медные сплавы. Определение величины удлинения спирали»). Борьба отдельных предприятий, изготавливающих медную катанку, привела к появлению патентов на способы производства продукции с повышенным показателем SEN [7].

Для оценки стабильности методики применили установку для определения показателя SEN на ЗАО СП «Катур-Инвест» (г.Верхняя Пышма Свердловской области). Марка исследуемой меди М00. Катанка получена методом непрерывного литья и прокатки по идеологии CONTIROD.

Ниже будут представлены результаты измерений спирального удлинения проволоки диаметром 2 мм одной из партий катанки, для которой показатель SEN не был установлен в качестве сдаточного параметра (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение показателя SEN для двух партий продукции

Номер партии	Расстояние между метками с грузом, L_{0i} мм	Расстояние без груза L_i , мм	$SEN_i = L_i - L_{0i}$, мм	Среднее значение SEN, мм	Медиана SEN, мм	Δ_{SEN} , мм
1	470	448	420	421	420	2,08
	482	451	423			
	475	447	419			
2	470	443	415	415	415	2,52
	470	440	412			
	470	445	417			

Стандартное отклонение рассчитано по

формуле $\Delta_{SEN} = \sqrt{\frac{(SEN_i - SEN)^2}{n-1}}$, где n –

объем выборки. Из приведенных данных видно, что даже при такой малой выборке средние значения SEN по двум партиям ощутимо различаются, а измерения значений внутри партии повторяются. Медианы близки к средним значениям, что говорит

о несмещенности оценок. В целом, это сравнение указывает на то, что измерения SEN однозначно характеризуют состояние металла внутри одной партии.

Более представительный статистический анализ применен к двум вариантам измерений показателя SEN: для катанки, прошедшей высокотемпературный отжиг при 700°C перед испытанием (объем выборки 49) и без него (объем выборки 114). Как видно из результатов расчетов (табл.2), среднее значение SEN после отжига увеличилось на 22 мм или на 5%. Этот факт говорит о том, что процессы динамической и

статической рекристаллизации катанки при завершении горячей прокатки проходят не полностью.

В варианте с отжигом среднее значение, медиана и мода практически совпали, что говорит о несмещенности оценок и подчинении нормальному закону распределения. Однако для случая без отжига разница между этими величинами оказалась большой. При этом наблюдается не очень большая разница в стандартных отклонениях двух вариантов.

Таблица 2

Статистические параметры SEN для двух вариантов подготовки образцов: с отжигом и без него

Статистический параметр	Для варианта с отжигом	Для варианта без отжига
Среднее	429,18	406,78
Стандартная ошибка	2,40	1,268
Медиана	430	408
Мода	432	415
Стандартное отклонение	16,77	13,54
Экссесс	0,10	1,91
Асимметричность	-0,47	-0,19
Максимум	463	457
Объем выборки	49	114

Для лучшего восприятия статистических данных на рис.1 построена гистограмма относительных частот (частоты отнесены к объему выборки) для этих двух вариантов подготовки образцов.

Из рисунка видно, что зависимости имеют различные максимумы частот: в варианте с отжигом максимум смещен в область больших значений SEN, что соответствует вышеприведенным данным по среднему значению. Линия тренда (полином четвертой степени) для варианта с отжигом имеет вид нормального закона распределения, т.е. эта зависимость близка к стохастической. Для варианта без отжига нормальность закона распределения выполняется хуже, поэтому линия тренда здесь не построена. Большие отклонения от закона нормального распределения говорят о том, что измерения оказываются не случайными числами – на них влияют не указанные технологические параметры, для которых не созданы статистические модели для описания внутренних связей. При этом в целом можно сделать заключение о том, что влияние этих факторов осталось не выровнено процессами

рекристаллизации, проходящими при горячей прокатке.

Для анализа кинематики проведения опыта на спиральное удлинение на рис.2 показано напряженное состояние, возникающее при нагрузке спирали, выполненной из проволоки диаметром d . Сила F приложена вдоль вертикальной оси спирали. В результате в каждом витке спирали возникает крутящий момент M_z и сила Q , численно равная силе P .

На рис.3 виток показан в более крупном масштабе, при этом ось спирали находится справа от витка, что показано стрелкой при значении диаметра спирали D . Крутящий момент M_z возникает из-за действия растягивающей силы F на плече приложения $D/2$, т.е. $M_z = F D/2$. В поперечном сечении витка вследствие этого возникают касательные напряжения кручения [8]

$$\tau_k = \frac{M_z}{W_\rho} = \frac{FD/2}{\pi(d/2)^3/2} = \frac{FD}{\pi(d/2)^3} \quad (1)$$

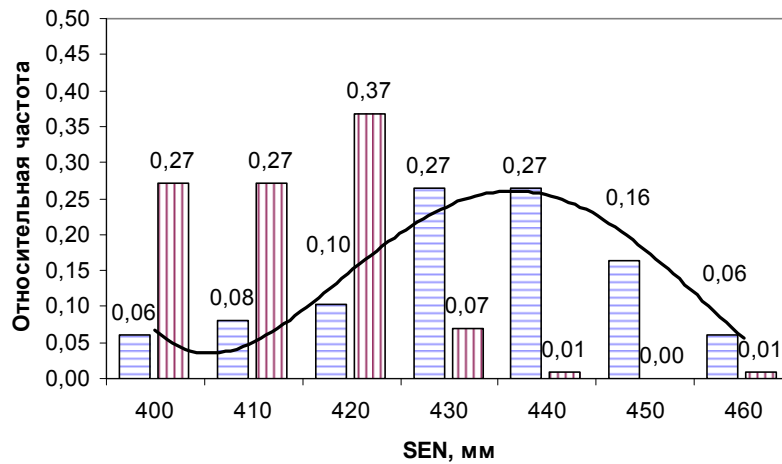


Рис1. Частотная гистограмма определения показателя SEN для образцов, прошедших высокотемпературный отжиг при 700°C (столбцы с горизонтальной штриховкой и линия тренда) и без отжига (столбцы с вертикальной штриховкой)

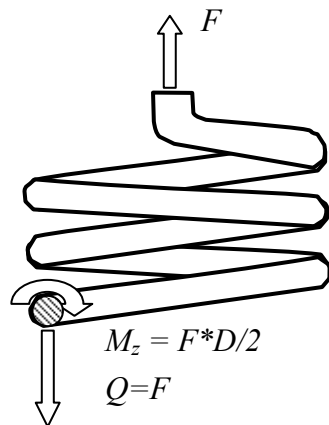


Рис.2. Схема нагружения спирали

Одновременно от среза возникают напряжения

$$\tau_c = \frac{Q}{S} = \frac{F}{\pi(d/2)^2}. \quad (2)$$

Знаки напряжений совпадают в точке W , поэтому здесь возникают наибольшие напряжения:

$$\tau_{\max} = \tau_{\kappa} + \tau_c = \frac{FD}{\pi(d/2)^3} + \frac{F}{\pi(d/2)^2} = \frac{FD}{\pi(d/2)^3} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d}{D}\right). \quad (3)$$

В оппозитной точке (наружный контур спирали) напряжения противоположны, поэтому они не

складываются, а вычитаются, здесь действуют минимальные напряжения

$$\tau_{\min} = \tau_{\kappa} - \tau_c = \frac{FD}{\pi(d/2)^3} - \frac{F}{\pi(d/2)^2} = \frac{FD}{\pi(d/2)^3} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{d}{D}\right). \quad (4)$$

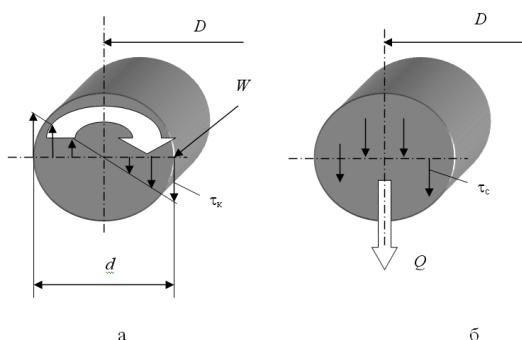


Рис.3. Схема нагружения одного витка спирали от напряжений кручения (а) и напряжений среза (б)

В соответствии с формулами (1-4) выполнены расчеты касательных напряжений эквивалентных условиям испытаний на параметр SEN и выявлено, что максимальные напряжения мало зависят от напряжений среза, это характерно для спиралей с малым отношением d/D , поэтому можно считать, что за формоизменение отвечают напряжения кручения, которые являются тангенциальными для самой проволоки. При достижении условия перехода в пластическое состояние, будет происходить закручивание витков спирали. Вклад тангенциальных напряжений особенно высок в периферийной области, поскольку площадь, на которой они действуют, оказывается велика. Однако именно при горячей прокатке медной катанки периферийные области оказываются в неоднородном силовом и тепловом поле: на периферийные слои несимметрично воздействуют ручки валков, и они же попадают под интенсивное охлаждение. Наследие горячей прокатки может сохраняться в проволоке в виде структурных и текстурных различий.

В самом же опыте на спиральное удлинение возникающие напряжения находятся в пластической области, т.е. являются функциями степени деформации. Чем выше темп нагартовки металла, тем более высокие прочностные свойства достигаются в опыте и тем меньше окажутся деформации, тем самым показатель SEN окажется меньше. Таким образом, показатель SEN частично учитывает химическую чистоту материала, и частично вид кривой упрочнения меди, т.е. он не полностью выполняет свои функции.

Как видно из описанной выше методики проведения опытов, существует довольно значительное количество параметров, которые могут оказать влияние на величину SEN. Среди этих параметров можно отметить следующие.

1. При испытании катодной меди следует приготовить образцы литьем, а параметры литья не оговариваются. В результате может быть получен металл с разной структурой и направлением роста дендритов. Скорее всего, расчет здесь сделан на то, что после горячей деформации, динамической и статической рекристаллизации история получения литой заготовки будет не важна. Однако для кислородсодержащей меди характерно распределение частиц оксида меди по границам зерен, поэтому, скорее всего, картина

концентрации упрочняющих частиц будет унаследована от литья. Логично предположить, что влияние параметров литья нельзя не учитывать.

2. При испытании медной катанки по той же причине остается значимым влияние способа получения литой заготовки. Например, важно, каким способом отлита заготовка, какие она имеет размеры, от этого зависит интенсивность теплоотвода, направление роста и размеры дендритов. Важно также распределение кислорода: часть его фиксируется в кристаллической решетке, а часть выделяется в виде закиси меди. При охлаждении предел растворимости кислорода в меди снижается и происходит выделение избыточного кислорода, т.е. важна скорость охлаждения.

3. При горячей сортовой прокатке самой катанки возникает большое количество параметров, влияющих на структурное состояние металла. Это процессы динамической, а затем статической рекристаллизации, на которые влияют температурные и скоростные режимы прокатки. Различная направленность воздействия валков по проходам прокатки создает возможность проявления остаточного текстурования металла.

4. При последующем волочении становятся важными такие параметры процесса, как угол волоки и коэффициент трения. Последними исследованиями установлено, что эти параметры значимо влияют на процесс формирования механических свойств медной проволоки [9,10]. В частности, увеличение угла волоки ведет к повышению прочностных свойств материала, что объясняется увеличением общей степени деформации за счет дополнительных сдвигов [11,12].

Кроме того, выявлено, что углы волоки влияют также на процесс текстурообразования в меди [13]. В последней работе (F.F.Kraft и др.) не были исследованы параметры, влияющие на SEN, но было установлено, что после волочения медной проволоки при полуугле волоки $\alpha = 4^\circ$ полюсная плотность ориентировки $\langle 111 \rangle$ составляет 24,4, а при $\alpha = 12^\circ$ только 5,9, соответственно для ориентировки $\langle 200 \rangle$ 8,0 и 2,2. Таким образом, увеличение угла волоки ведет к получению менее текстурованного материала.

Следует отметить, что при испытаниях на SEN проявляются упругие свойства материала, для меди наибольший модуль упругости на уровне 190 ГПа наблюдается для ориентировки $\langle 111 \rangle$ на фоне среднего модуля упругости 125 ГПа, таким образом, медь, протянутая через волоку с малым углом наклона образующей оказывается менее прочной, но более жесткой.

В работе F.F.Kraft было также показано, что по-разному протянутая медь имеет различную динамику отжига, что уже напрямую связано с показателем SEN. Судя по полученным данным, при прочих равных условиях при меньшей температуре отжигается медь, протянутая через волоку с большими углами, при разнице измеренных температур в диапазоне 15...20°C. Это

можно объяснить большим уровнем деформации, полученной в этих условиях проволокой, что не противоречит устоявшимся взглядам на закономерности прохождения процесса рекристаллизации. Косвенно это подтверждается тем фактом, что рекристаллизация начинается с поверхности проволоки, где уровень степени деформации наиболее высок [14].

Таким образом, если не оговорить специально условия подготовки образца проволоки, то можно получить завышенные или заниженные результаты измерений. Наибольшие величины SEN получаются при полном отжиге, а этому способствует применение волок с большими углами наклона образующей. Наоборот, применяя волокна с малыми углами, можно неосознанно снизить показатель качества продукции и получить неверные данные о степени загрязненности меди примесями.

В настоящее время не до конца ясным остается вопрос о зависимости величины SEN от параметров скорости обработки металла. Выполненные измерения показывают, что определение SEN при подготовке образцов проволоки вручную (при протяжке коротких образцов на малой скорости приложения нагрузки) показывают повышенное значение SEN, а при протяжке на рабочих скоростях волочения – пониженное значение. Можно отметить, что в технической литературе сравнительно недавно начали появляться статьи, анализирующие изменение свойств материалов под влиянием варьирования скорости волочения [15-17] – факт, который ранее отрицался, поэтому отмеченный аспект нуждается в дополнительном изучении.

Таким образом анализом ситуации выявлено, что при проведении испытаний на спиральное удлинение медной проволоки следует проверять выполнение требования стандартов по созданию заданного механического напряжения, а также уточнять степень деформации, накопленную в металле. Применение высокотемпературного отжига меди приводит к увеличению показателя спирального удлинения, а также увеличивает его стохастическую значимость. Методика определения показателя спирального удлинения нуждается в уточнениях с целью стабилизации получаемых результатов. Показатель спирального удлинения является сложной функцией химического состава, структурного, текстурного и деформированного состояния меди.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 546-2001. Межгосударственный стандарт. Катоды медные. Введ. 01.03.2002.
- ТУ 1844-01-48564189-2000. Катанка медная. Введ. 31.12.2000.
- ГОСТ 28515-97. Медь. Метод испытания проб на удлинение спирали. Введ. 01.07.1998.
- Schamp J., Verlinden B., Van Humbeeck J. Primary recrystallization and grain growth of tough pitch copper wire. *Journal De Physique IV. Colloque C3*. 1995. V. 5. P. 273-278.
- Camurri Carlos, Carrasco Claudia, Albretch Soraya. Impurities on cathodic copper: study of their influence on the ductility of copper wires and development of mechanical tests sensible to such impurities. 19 Ročník mezinárodní konference metalurgie a materiálů. Rožnov pod Radhoštěm. 2010.
- Kwapisiński P. Complex interpretation of the deltha lt parameter in spiral elongation test. *Rudy i Metale Nieżelazne*. 2003, V. 48. N 7. P. 310-315.
- Патент США №US4290823. Manufacture of copper wire rod/ Dompas J. Заявитель Metallurgie Hoboken. МПК B21B3/00; B22D11/06. Приоритет 25.10.1979. Оpubл. 22.09.1981.
- Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. Изд.3. М.: Высшая школа, 2003. 560с.
- De Castro A.L.R., Campos H.B., Cetlin P.R. Influence of die semi-angle on mechanical properties of single and multiple pass drawn copper. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. V.60. P. 179-182.
- Campos H.B., Cetlin P.R. The influence of die semi-angle and of the coefficient of friction on the uniform tensile elongation of drawn copper bars. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. V. 80–81. P. 388–391.
- Логинов Ю.Н., Василевский П.А., Радионов Л.В. Исследование влияния угла конусности волокна на механические свойства протянутого полуфабриката. *Цветные металлы*, 2004. №6. С.104-106.
- Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials and Design*. 2009. V. 30. P. 3308–3312.
- Kraft F.F., Chakkingal U., Baker G., Wright R.N. The effects of die angle on texture and annealing response of ETP copper wire. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. V. 60 P. 171-178.
- Schamp J., Verlinden B., Van Humbeeck J. Recrystallisation at ambient temperature of heavily deformed ETP copper wire. *Scripta Materialia*. 1996. V. 34, N. 11. P. 1667-1672.
- Bhattacharyya A., Rittel D., Ravichandran G. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper. *Scripta Materialia*. 2005. V. 52. P 657–661.
- Loginov Yu.N., Demakov S.L., Illarionov, A.G., Popov A.A. Effect of the Strain Rate on the Properties of Electrical Copper. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011. V. 3, P. 194–201.
- Sy-Wei Lo, Yuung-Hwa Lu. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 123. P. 212–218.